

15. Gorelova G.V. Decision adapted system for information network control, *G-11A-Symposium, Bochum, DDR, 1996*, pp. 121-126.
16. Gorelova G.V. Modeli prinyatiya resheniy pri proektirovani i upravlenii ob'ektami v usloviyakh veroyatnostnoy neopredelennosti [Decision-making models in the design and management of facilities in conditions of probabilistic uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 177-188.
17. Avdeeva Zinaida K., Kovriga Svetlana V. On Governance Decision Support in the Area of Political Stability Using Cognitive Maps, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 498-503.
18. Abramova N., Portsev R. Reflexive Approach to Multi-Subject Situations in Cognitive Mapping, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 516-521.
19. Kul'ba V.V., Kononov D.A., Kovalevskiy S.S., Kosyachenko S.A., Nizhegorodtsev R.M., Chernov I.V. Stsenarnyy analiz dinamiki povedeniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: nauchnoe izdanie [Scenario analysis of the dynamics of behavior of socio-economic systems: scientific publication]. Moscow: IPU RAN, 2002, 122 p.
20. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 145-149.
21. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Strategy of complex systems development based on the synthesis of foresight and cognitive modelling methodologies, *Proceedings. IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing. SAIC 2018*.
22. Innovatsionnoe razvitie sotsio-ekonomicheskikh sistem na osnove metodologiy predvideniya i kognitivnogo modelirovaniya: kollektivnaya monografiya [Innovative development of socio-economic systems based on foresight and cognitive modeling methodologies: collective monograph], ed. by Gorelovoy G.V., Pankratovoy N.D. Kiev: Izd-vo «Naukova Dumka», 2015, 464 p.
23. Programma dlya kognitivnogo modelirovaniya i analiza sotsial'no-ekonomicheskikh sistem regional'nogo urovnya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2018661506 ot 07.09.2018 [A program for cognitive modeling and analysis of socio-economic systems at the regional level. Certificate of state registration of computer programs No. 2018661506 of 09/07/2018].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Горелова Галина Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89281684458; д.т.н.; профессор.

Gorelova Galina Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281684458; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.365

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-144-155

В.А. Горелов, И.В. Рубцов, А.А. Стадухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ РОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обосновывается необходимость применения имитационного компьютерного моделирования для дальнейшего совершенствования подвижности мобильных робототехнических комплексов. Рассматривается такое направление работ, как исследование шасси с адаптируемой конфигурацией гусеничного обвода с применением программного комплекса автоматизированного анализа динамики систем тел. Данный подход позиционируется как наиболее подходящий для оценки профильной проходимости и выбора потребных характеристик приводов машин с нетрадиционным движителем. Также в статье рассмотрены достижения МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию комплекса натурно-математического

моделирования, предназначенного для исследования динамики мобильных робототехнических комплексов и дистанционно управляемых машин. Комплекс основан на математической модели движения машины, адаптированной для проведения расчетов в режиме «реального времени». В работе приведена краткая характеристика модели и основные дифференциальные уравнения, лежащие в её основе. Помимо это необходимой составляющей комплекса натурно-математического моделирования является программное обеспечение, позволяющее осуществлять синтез трасс по известным заранее заданным статистическими характеристиками. Таким образом, разработанный комплекс натурно-математического моделирования позволяет решать следующий ряд основных задач: исследование быстроходности машин и получение нагрузочных характеристик тягового привода, а также отладка алгоритмов управления и изучение взаимодействия водителя-оператора с машиной и внешней средой в условиях задержки управляющего сигнала и помех. Метод имитационного моделирования также имеет важное применение в области совершенствования моторно-трансмиссионных установок робототехнических комплексов и дистанционно управляемых машин. В связи с тем, что на данный момент наиболее распространённой схемой трансмиссии таких машин является индивидуальный привод ведущих колёс, повышение скоростей движения мобильных роботов требует применения более мощных, а значит более дорогостоящих и тяжёлых электродвигателей. Так, в статье предложен подход, основывающийся на имитационном и натурно-математическом моделировании, который позволяет осуществлять сбор необходимых статистических данных о режимах нагружения машин и определять требуемые характеристики электродвигателей в кратковременном и длительном режимах работы, а также желаемую область с максимальным коэффициентом полезного действия.

Имитационное моделирование; адаптируемое шасси; моделирование в реальном времени; маршруты движения; движение по траектории.

V.A. Gorelov, I.V. Rubtsov, A.A. Stadukhin

MOBILITY ANALYSIS OF ROBOT SYSTEMS BY MEANS OF SIMULATION

The article explains reasons for using computer simulation for mobility enhancement of mobile robot systems. The authors focus on the study of the chassis with adaptable configuration of the tracks with the use of the multi-body dynamics software. This approach is asserted to be the most suitable for assessing the cross-country ability and selection of the required characteristics of the drive of vehicles with unconventional running gear. The article also discusses the driving simulator developed at BMSTU for studying the dynamics of mobile robot systems and remotely controlled vehicles. The simulator is based on a mathematical model of the vehicle motion adapted for performing calculations in real time mode. The paper presents a brief description of the model and its main differential equations. In addition to this, a necessary component of the simulator is the software that provides the synthesis of the driving routes based on the known pre-defined statistical characteristics. Thus, the developed simulator allows solving the following main problems: calculating the attainable speed of vehicles and obtaining the load characteristics of the traction drive, as well as debugging control algorithms and studying the interaction of the driver-operator with the vehicle and the environment in the conditions of control signal delay and interference. The simulation method also has an important application in the field of improving the motor-transmission systems of robot systems and remotely controlled machines. Due to the fact that at the moment the most common transmission layout of such vehicles is an individual drive of the driving wheels, increasing the speed of movement of mobile robots requires the use of more powerful, and therefore more expensive and heavy electric motors. Thus, the article proposes an approach based on simulation and full-scale and mathematical modeling, which allows to collect the necessary statistical data about the loading modes of the vehicles and determine the required characteristics of electric motors in short-term and long-term operation modes, as well as the desired operating range of the maximum efficiency.

Simulation; adaptable chassis; real-time simulation; driving routes; driving along a trajectory.

Введение. Одним из наиболее важных направлений совершенствования наземных мобильных робототехнических комплексов (МРК) является повышение их подвижности. Так, перспективным направлением улучшения проходимости и быстроходных свойств МРК, является применение нетрадиционных типов двигателей (например, адаптируемых шасси), использование силовых установок большей удельной мощности, а также разработка и совершенствование алгоритмов управления движением машин и способов взаимодействия с водителем-оператором. Очевидно, что реализация перечисленных подходов к повышению подвижности рассматриваемого типа робототехнических комплексов невозможна без применения имитационного математического моделирования.

Так, например, в ряде случаев для улучшения профильной проходимости МРК применяются технические решения, основанные на адаптивно изменяемой геометрии гусеничного обвода [1]. Использование классических зависимостей теории движения гусеничных машин не представляется возможным при исследовании подвижности комплексов такого типа. В связи с этим применение имитационного математического моделирования является единственным способом исследования таких систем, помимо дорогостоящих натурных испытаний.

Постановка задачи. В настоящее время существует большое количество разнообразного программного обеспечения, позволяющего осуществлять динамическое моделирование шасси с необычными двигателями. Так на рис. 1 показана схема четырехгусеничной машины созданной в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм». Разработанная модель позволяет исследовать профильную проходимость МРК при преодолении препятствий различного типа, определять требуемые характеристики тяговых приводов ведущих колёс и флипперов, а также анализировать динамические процессы, протекающие при движении машины.

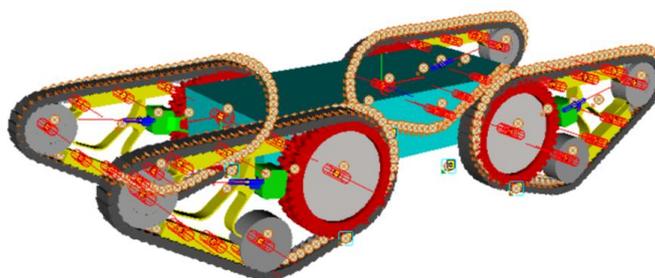


Рис. 1. Общий вид модели гусеничной машины с адаптируемым шасси в редакторе программы динамического моделирования

На текущий момент в МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся исследования подвижности колесных и гусеничных машин с учетом особенностей взаимодействия системы «человек-машина-местность». Для решения представленной задачи разработан комплекс натурно-математического моделирования, позволяющий исследовать динамику машины в режиме «реального времени» под управлением водителя-оператора [2]. На рис. 2 показано рабочее место оператора комплекса натурно-математического моделирования.



Рис. 2. Рабочее место водителя-оператора комплекса натурно-математического моделирования

В отличие от программных комплексов автоматизированного анализа динамики систем тел (например, «Универсальный механизм», «Эйлер», «Адамс» и т.д.), где производится автоматизированное составление дифференциальных уравнений движения, разработка программного обеспечения для комплекса натурно-математического моделирования потребовала использования собственной математической модели, способной проводить расчеты в режиме «реального времени», для обеспечения возможности взаимодействия с водителем-оператором.

Так, в ряде работ представлен общий подход к созданию математической модели динамики гусеничных [3–5] и колёсных машин [6–10] пригодных для применения в разработанном комплексе. В данных работах движение машины рассматривается как движение твердого тела в горизонтальной плоскости по ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного вокруг него (рис. 3).

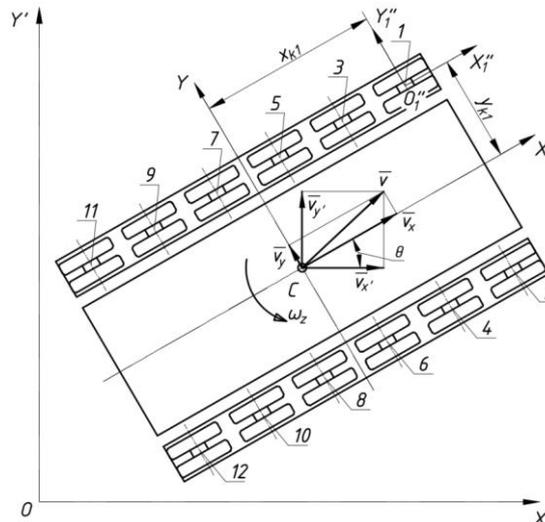


Рис. 3. Расчетная схема движения машины на примере гусеничного робототехнического комплекса

Согласно данному подходу связь опорных катков/колес с корпусом машины в вертикальной плоскости рассматривается как жесткая. Для учета в модели перераспределения нормальных реакций от действия силы сопротивления воздуха, моментов сопротивления качению, ускорения центра масс и силы тяжести используется принцип возможных перемещений.

Данная математическая модель была применена при создании комплекса натурно-математического моделирования. Его реализация потребовала решения в программном коде следующей системы дифференциальных уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = \frac{dv_x}{dt} - \omega_z v_y = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n R_{x_i} - P_w \right) \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} + \omega_z v_x = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n R_{y_i} \right) \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^n M(R_{y_i}) - \sum_{i=1}^n M(R_{x_i}) - \sum_{i=1}^n M_{сп_i}, \\ v_{x'} = \frac{dx'}{dt} = v_x \cos(\theta) - v_y \sin(\theta) \\ v_{y'} = \frac{dy'}{dt} = v_x \sin(\theta) + v_y \cos(\theta) \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $x - y$ – система координат, связанная корпусом машины;

$x' - y'$ – глобальная система координат;

m – масса машины;

J_z – момент инерции машины относительно вертикальной оси z , проходящей через центр масс C ;

a_x, a_y – проекции ускорения центра масс машины на оси координат $x - y$;

v_x, v_y – проекции скорости центра масс машины на оси координат $x - y$;

$v_{x'}, v_{y'}$ – проекции скорости центра масс машины на оси координат $x' - y'$;

$\frac{dv_x}{dt}, \frac{dv_y}{dt}$ – проекции относительной производной вектора скорости центра масс ГМ на оси координат $x - y$;

ω_z – проекция вектора угловой скорости поворота машины на вертикальную ось z ;

θ – угол поворота машины в неподвижной системе координат;

x', y' – координаты центра масс машины в системе координат $x' - y'$;

R_{x_i} – продольная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности);

R_{y_i} – поперечная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности);

P_w – проекция вектора силы сопротивления воздуха на ось x системы координат $x - y$;

$M_{сп_i}$ – момент сопротивления повороту активного участка гусеницы под i -ым катком вокруг вертикальной оси, проходящей через центр этого участка;

n – число опорных катков.

Система уравнений движения (1) машины содержит:

- ♦ уравнения динамики, описывающие движение машины, полученные на основе закона сохранения количества движения и момента количества движения в подвижной системе координат (первые три уравнения);

- ♦ кинематические уравнения связи угловых и линейных скоростей с угловыми и пространственными координатами, полученные на основе уравнений связи между координатными системами $x - y$ и $x' - y'$ для обеспечения возможности определения положения машины в пространстве (последние три уравнения).

Сила взаимодействия с грунтом активных участков движителей в плоскости опорного основания определяется при помощи подхода, основанного на представлении об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в точках контакта.

Использование комплекса натурно-математического моделирования для получения данных о нагруженности машин осуществляется за счет виртуальных заездов по специально синтезированным трассам. При синтезе необходимо использовать статистические методы с целью получения новых трасс, незнакомых для водителей-операторов, однако с заранее заданными условиями движения.

Для получения характеристик маршрута (дорожная кривизна, максимальный коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием, коэффициент сопротивления качению, угол наклона опорной поверхности) авторами использовался метод неканонических представлений, который является одним из наиболее распространенных для решения статистических инженерных задач.

Согласно, данному методу, реализация любой стационарной случайной функции $f(s)$ представляется в следующем виде:

$$f(s) = m_f + \sigma_f \sqrt{\frac{2}{N_f}} \sum_{j=1}^{N_f} \cos(\omega_j s + \varphi_j), \quad (2)$$

где s – аргумент случайной функции (в данном случае путь);

m_f – математическое ожидание стационарной случайной функции;

σ_f – среднеквадратическое отклонение стационарной случайной функции;

N_f – число реализаций случайной функции;

ω_j – пространственные частоты случайного процесса;

φ_j – начальные фазы случайного процесса.

Начальные фазы φ_j получают путем «розыгрыша» по методу Монте-Карло, используя равномерный закон распределения на интервале $\varphi_j \in [0, 2\pi]$.

Для «розыгрыша» ω_j также применяют метод Монте-Карло, используя закон распределения случайной функции пространственной частоты, который определяется следующим образом:

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_f(\tau)}{\sigma_f^2} e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\omega} \varphi(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $R_f(\tau)$ – корреляционная функция стационарной случайной функции;

$\varphi(\omega)$ – плотность распределения случайной функции пространственной частоты;

$\Phi(\omega)$ – закон распределения случайной функции пространственной частоты.

Далее, используя полученные значения ω_j и φ_j в зависимости **Ошибка! Источник ссылки не найден.** и задавая значение аргумента s , определяется соответствующее реализации значение функции $f(s)$. Более подробно метод синтеза трасс описан в работе [11].

Получаемые в результате виртуальных заездов временные реализации параметров движения машины используются для дальнейшего анализа и оценки влияния различных факторов на подвижность машины.

Представленный комплекс обладает широкими возможностями по исследованию движения машин в условиях, приближенных к реальной эксплуатации:

- ◆ исследование быстроходности машин [12];
- ◆ исследование нагрузочных характеристик моторно-трансмиссионной установки [13];
- ◆ отладка алгоритмов управления машиной [14];
- ◆ исследование влияния задержки сигнала при дистанционном управлении машиной;
- ◆ обучение водителей и исследование психофизиологических аспектов управления машиной водителем-оператором и т.д.

При натурно-математическом моделировании принципиально важным является адекватное задание условий движения машины. В связи с этим в МГТУ им. Н.Э. Баумана проведена работа по созданию специального программного обеспечения, позволяющего синтезировать маршрут, обладающий заданными статистическими характеристиками, непосредственно перед заездом, что предупреждает возможность возникновения эффекта «запоминания» трассы водителем-оператором. Пример статистически «разыгранного» маршрута в окне комплекса натурно-математического моделирования представлен на рис. 4.

Создаваемые таким образом трассы могут использоваться как для исследования движения машины под управлением водителя-оператора, так и для имитационного компьютерного моделирования динамики без учета «человеческого фактора».

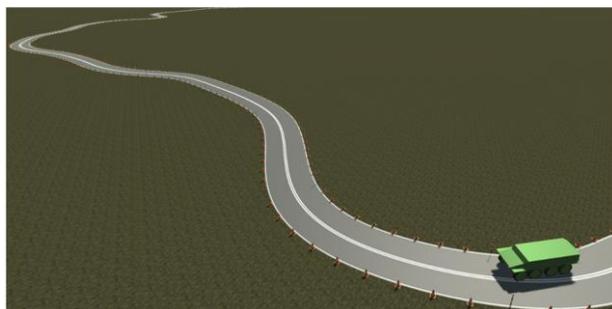


Рис. 4. Вид трассы разыгранной для проведения исследования с использованием комплекса натурно-математического моделирования

Потребность в повышении эксплуатационных скоростей роботизированных транспортных средств требует совершенствования наиболее характерного для таких машин индивидуального тягового электропривода ведущих колёс. Результаты подобных исследований изображены на рис. 5. Представленная гистограмма отображает наиболее вероятные режимы нагружения тяговых электродвигателей гусеничной машины оснащенной индивидуальным приводом ведущих колес, полученные под управлением водителем-оператором при движении по статистически разыгранной трассе [15].

Представленные данные позволяют уточнить результаты аналитического тягового расчёта по определению потребной механической характеристики тяговых электродвигателей в длительных и кратковременных режимах работы для обеспечения заданного уровня подвижности машины, а также определить желаемую зону высокого КПД электропривода.

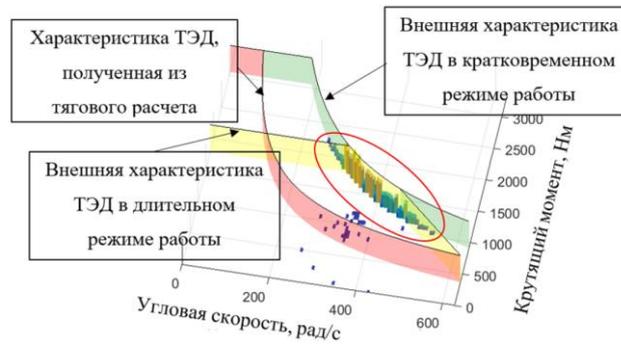


Рис. 5. Результаты моделирования движения дистанционно управляемой гусеничной машины по статистически разыгранной трассе (отмечена наиболее используемая область характеристики электродвигателя, где желательно обеспечить наибольший КПД)

Развитие автономного (программно-управляемого) транспорта использующего, в том числе, нетрадиционные типы движителей, вызывает необходимость разработки в том числе новых алгоритмов управления движением. На рис. 6 показаны результаты моделирования типовой задачи автономного вождения [16–20] – движение по заданной траектории. При исследовании использовалось программное обеспечение Matlab/Simulink/Simscapе. Объектом исследования являлся беспилотный карьерный самосвал с передним и задним управляемыми мостами.

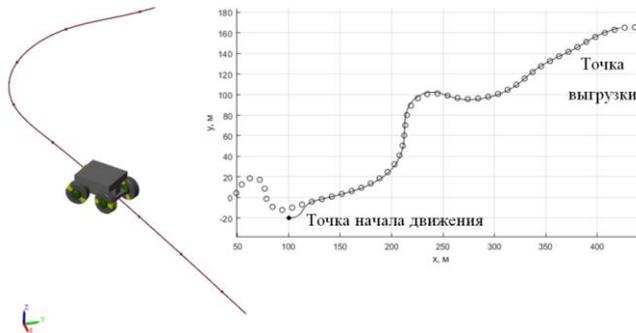


Рис. 6. Заданный маршрут и траектория по результатам моделирования движения роботизированного карьерного самосвала

Заключение. Рассмотренные решенные научные задачи позволяют сделать вывод, что разработка мобильных робототехнических комплексов с параметрами, обеспечивающими уровень подвижности, соответствующий современному техническому уровню развития, может быть значительно более эффективной за счёт применения имитационного математического моделирования и в частности натурно-математического моделирования.

При этом, не смотря на обилие специализированного программного обеспечения предназначенного для моделирования движения машин, зачастую возникают задачи требующие разработки собственного исследовательского инструментария.

Включение в состав моделирующих комплексов человека (водителя оператора) хотя и расширяет перечень решаемых задач, но одновременно затрудняет проведение экспериментов. Так, уникальный характер каждого заезда требует проведения многократных исследований, причем желательно обеспечивать высокое разнообразие трасс.

Разработка и совершенствование метода синтеза условий движения (трассе) позволило не только проводить эффективные заезды с реальными водителями-операторами, но также определять нагрузочные режимы трансмиссии и отлаживать алгоритмы автоматического вождения путем классического (не в режиме «реального времени») имитационного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hui Jiang, Guoyan Xu, Wen Zeng, Feng Gao.* Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot // *Mechanism and Machine Theory.* – 2019. – Vol. 142, 103591. – ISSN 0094-114X. – <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103591>.
2. *Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А., Косицын Б.Б.* Определение режимов работы индивидуального электропривода ведущих колес полноприводной колесной машины с использованием комплекса натурно-математического моделирования // *Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем.* – 2018. – С. 66-80.
3. *Красеньков В.И., Харитонов С.А.* Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины // *Тр. МВТУ.* – 1980. – № 339. – С. 3-67.
4. *Гаврин Н.О.* Прогнозирование режимов движения робототизированной гусеничной машины: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 180 с.
5. *Гуськов В.В., Опейко Ф.А.* Теория поворота гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 167 с.
6. *Чернышев Н.В.* Комплексная система управления поворотом боевой колёсной машины 8×8: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 118 с.
7. *Косицын Б.Б.* Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
8. *Горелов В.А.* Прогнозирование характеристик криволинейного движения полноприводного автомобиля с формулой рулевого управления 1-0-3 при различных законах управления колесами задней оси: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008. – 195 с.
9. *Горелов В.А.* Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 336 с.
10. *Бузунов Н.В.* Метод разработки законов управления нагрузателем рулевого колеса при отсутствии «жесткой» связи в системе управления поворотом колесных машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 186 с.
11. *Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Моделирование реализаций случайных функций характеристик дорожно-грунтовых условий при исследовании динамики колесных и гусеничных машин на этапе проектирования // *Известия МГТУ «МАМИ».* – 2019. – Вып. № 3 (41). – С. 36-46. – DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46.
12. *Котиев Г.О., Падалкин Б.В., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А., Косицын Б.Б.* Теоретические исследования подвижности быстроходных гусеничных машин с электротрансмиссиями // *Прогресс транспортных средств и систем* – 2018: Матер. международной научно-практической конференции / под ред. И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. – С. 27-36.
13. *Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В., Падалкин Б.В., Стадухин А.А.* Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колес // *Тр. НАМИ.* – 2019. – № 3 (278). – С. 22-35.
14. *Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Регулятор системы управления поворотом быстроходной гусеничной машины с индивидуальным приводом ведущих колес // *Известия МГТУ «МАМИ».* – 2019. – Вып. № 4 (42). – С. 21-28. – DOI: 10.31992/2074-0530-2019-42-4-21-28.
15. *Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А.* Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования. // *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* – 2019. – № 3 (126). – С. 120-134.

16. Xiong Zhe Han, Hak Jin Kim, Joon Yong Kim, Sang Yup Yi, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Young Joo Kim. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2015. – Vol. 112. – P. 161-171. – ISSN 0168-1699. – <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.025>.
17. Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, Issue 17. – P. 227-231. – ISSN 2405-8963. – <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.149>.
18. Te Chen, Long Chen, Xing Xu, Yingfeng Cai, Haobin Jiang, Xiaoqiang Sun. Passive actuator-fault-tolerant path following control of autonomous ground electric vehicle with in-wheel motors // *Advances in Engineering Software*. – 2019. – Vol. 134. – P. 22-30. – ISSN 0965-9978. – <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.05.003>.
19. Bai Li, Zhijiang Shao. Precise trajectory optimization for articulated wheeled vehicles in cluttered environments // *Advances in Engineering Software*. – 2016. – Vol. 92. – P. 40-47. – ISSN 0965-9978. – <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.008>.
20. Khalil Alipour, Arsalan Babaei Robot, Bahram Tarvirdizadeh. Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip // *Mechanism and Machine Theory*. – 2019. – Vol. 138. – P. 16-37. – ISSN 0094-114X. – <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.038>.

REFERENCES

1. Hui Jiang, Guoyan Xu, Wen Zeng, Feng Gao. Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, Vol. 142, 103591. ISSN 0094-114X. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103591>.
2. Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. Opredelenie rezhimov raboty individual'nogo elektroprivoda vedushchikh koles polnoprivodnoy kolesnoy mashiny s ispol'zovaniem kompleksa naturno-matematicheskogo modelirovaniya [Determining the operating modes of an individual electric drive of the driving wheels of a four-wheel drive vehicle using a complex of natural and mathematical modeling], *Tekhnologii i komponenty intellektual'nykh transportnykh system* [Technologies and components of intelligent transport systems], 2018, pp. 66-80.
3. Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A. Dinamika krivolinyenogo dvizheniya transportnoy gusenichnoy mashiny [Dynamics of curvilinear movement of a transport tracked vehicle], *Tr. MVTU* [Proceedings of the Moscow higher technical school], 1980, No. 339, pp. 3-67.
4. Gavrin N.O. Prognozirovanie rezhimov dvizheniya robototizirovannoy gusenichnoy mashiny: diss. ... kand. tekhn. nauk [Predicting the movement modes of a robotic tracked vehicle: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2001, 180 p.
5. Gus'kov V.V., Opeyko F.A. Teoriya povorota gusenichnykh mashin [The theory of turning of tracked vehicles]. Moscow: mashinostroenie, 1984, 167 p.
6. Chernyshev N.V. Kompleksnaya sistema upravleniya povorotom boevoy kolesnoy mashiny 8×8: diss. ... kand. tekhn. nauk [Integrated turn control system for an 8×8 combat wheeled vehicle: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2009, 118 p.
7. Kositsyn B.B. Metod opredeleniya energoeffektivnogo zakona dvizheniya elektrobusa po gorodskomu marshrutu: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method for determining the energy-efficient law of electric bus traffic on an urban route: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 165 p.
8. Gorelov V.A. Prognozirovanie kharakteristik krivolinyenogo dvizheniya polnoprivodnogo avtomobilya s formuloy rulevogo upravleniya 1-0-3 pri razlichnykh zakonakh upravleniya kolesami zadney osi: disc. ... kand. tekhn. nauk [Predicting the characteristics of curvilinear motion of a four-wheel drive car with the steering formula 1-0-3 under different laws of control of the wheels of the rear axle: dr. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. Bauman, 2008, 195 p.
9. Gorelov V.A. Nauchnye metody povysheniya bezopasnosti i energoeffektivnosti dvizheniya mnogoosnykh kolesnykh transportnykh kompleksov: disc. ... d-ra tekhn. nauk [Scientific methods for improving the safety and energy efficiency of multi-axis wheeled transport systems: dr. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2012, 336 p.

10. *Buzunov N.V.* Metod razrabotki zakonov upravleniya nagruzhatel'm rulevogo kolesa pri otsutstvii «zhestkoy» svyazi v sisteme upravleniya povorotom kolesnykh mashin: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method for developing laws for steering wheel loader control in the absence of a "rigid" connection in the steering system of wheeled vehicles: cand. of eng. sc. diss.]: 05.05.03. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 186 p.
11. *Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Modelirovanie realizatsiy sluchaynykh funktsiy kharakteristik dorozhno-gruntovykh usloviy pri issledovanii dinamiki kolesnykh i gusenichnykh mashin na etape proektirovaniya [Modeling of realizations of random functions of characteristics of road-ground conditions in the study of the dynamics of wheeled and tracked vehicles at the design stage], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Izvestiya MSTU "MAMI"], 2019, Issue No. 3 (41), pp. 36-46. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46.
12. *Kotiev G.O., Padalkin B.V., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B.* Teoreticheskie issledovaniya podvizhnosti bystrokhodnykh gusenichnykh mashin s elektrotransmisiyami [Theoretical studies of the mobility of high-speed tracked vehicles with electrotransmission], *Progress transportnykh sredstv i sistem – 2018: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Progress of vehicles and systems-2018: Materials of the international scientific and practical conference], ed. by I.A. Kalyaeva, F.L. Chernous'ko, V.M. Prikhod'ko, pp. 27-36.
13. *Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Padalkin B.V., Stadukhin A.A.* Opredelenie kharakteristik transmissiy kolesnykh i gusenichnykh mashin s individual'nym elektroprivodom vedushchikh koles [Determination of characteristics of transmissions of wheeled and tracked vehicles with individual electric drive of driving wheels], *Tr. NAMI* [Trudy NAMI], 2019, No. 3 (278), pp. 22-35.
14. *Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Regulyator sistemy upravleniya povorotom bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny s individual'nym privodom vedushchikh koles [Regulator of the turn control system of a high-speed tracked vehicle with an individual drive of the driving wheels], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Izvestiya MSTU "MAMI"], 2019, Issue No. 4 (42), pp. 21-28. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-42-4-21-28.
15. *Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A.* Metod opredeleniya kharakteristik individual'nogo tyagovogo elektroprivoda dvukhzvennoy gusenichnoy mashiny na etape proektirovaniya [Method for determining the characteristics of an individual electric traction drive of a two-link tracked vehicle at the design stage], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU R.E. Alekseeva], 2019, No. 3 (126), pp. 120-134.
16. *Xiong Zhe Han, Hak Jin Kim, Joon Yong Kim, Sang Yup Yi, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Young Joo Kim.* Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, Vol. 112, pp. 161-171. ISSN 0168-1699. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.025>.
17. *Kim D.H., Choi C.H., Kim Y.J.* Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, Issue 17, pp. 227-231. ISSN 2405-8963. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.149>.
18. *Te Chen, Long Chen, Xing Xu, Yingfeng Cai, Haobin Jiang, Xiaoqiang Sun.* Passive actuator-fault-tolerant path following control of autonomous ground electric vehicle with in-wheel motors, *Advances in Engineering Software*, 2019, Vol. 134, pp. 22-30. ISSN 0965-9978. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.05.003>.
19. *Bai Li, Zhijiang Shao.* Precise trajectory optimization for articulated wheeled vehicles in cluttered environments, *Advances in Engineering Software*, 2016, Vol. 92, pp. 40-47. ISSN 0965-9978. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.008>.
20. *Khalil Alipour, Arsalan Babaeei Robat, Bahram Tarviridizadeh.* Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, Vol. 138, pp. 16-37. ISSN 0094-114X. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.038>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.Б. Сарач.

Горелов Василий Александрович – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: gorelov_va@bmstu.ru; 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; тел.: +74992636905; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; зав. кафедрой; д.т.н.

Рубцов Иван Васильевич – e-mail: sm7@sm.bmstu.ru; тел.: +74992636778; кафедра робототехнических систем и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Стадухин Антон Алексеевич – e-mail: ant.m@bmstu.ru; тел.: 84992636905; кафедра много-целевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Gorelov Vasily Aleksandrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: gorelov_va@bmstu.ru; Moscow, 2-ya Baumanskaya street, 5, 105005, Russia; phone: +74992636905; the department of the multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; head of department; dr. of eng. sc.

Rubtsov Ivan Vasilevich – e-mail: sm7@sm.bmstu.ru; phone: +74992636778; the department of the robotic systems and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Stadukhin Anton Alekseevich – e-mail: ant.m@bmstu.ru; phone: +74992636905; the department of the multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.